

## 분말성형 정밀부품



김 용 진

한국기계연구원

- 재료연구부 책임연구원
- 관심분야 : 분말재료
- E-mail : yjkim@kmail.kimm.re.kr

송 인 혁

한국기계연구원

- 재료연구부 선임연구원
- 관심분야 : 분말합성, 광학전자재료
- E-mail : sih1654@kmail.kimm.re.kr

### 1. 분말성형 정밀부품 기술 개요

분말성형기술은 용해, 주조 또는 단조 등 일반적인 부품제조 기술에 비해 높은 치수정밀도, 대량생산 부품에 적합하고, 기계가공 재료손실이 최소화(net shape)되며, 복합 및 복잡 형상 부품 제작이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 이 기술은 각종 부품의 생산비 저감, 경량화, 고성능화가 가능하기 때문에 자동차, 전자용 정밀부품과 공구·금형 등에 널리 활용되고 있다. 특히 분말의 입자크기, 온도제어에 의해 고청정/초미세의 소재를 제조할 수 있어 주조기술 등으로 구현할 수 없는 고강도, 저밀도, 초미세, 복합 부품 등 수요자가 원하는 다양한 종류의 재료나 부품을 제조할 수 있는 장점이 있다. 따라서 분말성형기술을 적용한 소재·부품은 기존의 가공공정에 의해 제조하는 것보다 일반 부품에 있어서는 40% 이상 저비용으로 생산할 수 있고, 다기능 부품 및 고용점의 초경 세라믹 공구나 금형에 대응할 수 있는 유일한 기술이기 때문에 그 중요도는 점점 증가하고 있다.

최근 산업이 고도화됨에 따라 요구되는 부품의 특성이 초고강도화, 경량화, 고기능화 되어가고 있으며, 이러한 요구에 효율적으로 대처하기 위해서는 소재의 미세구조 자체를 원천적으로 제어해야 한다. 이에 따라 향후의 분말기술은 부품의 수명 향상을 위한 초고강도화, 환경, 에너지 문제 및 연비향상을 위한 경량화 및 다기능을 위한 다공질화 추세로 진행될 것으로 예상된다.

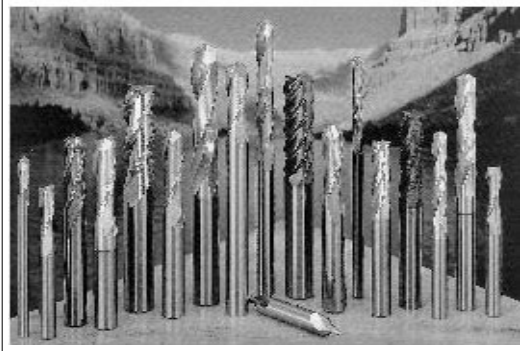


그림 1. 분말성형기술에 의해 제조되는 정밀부품 및 공구

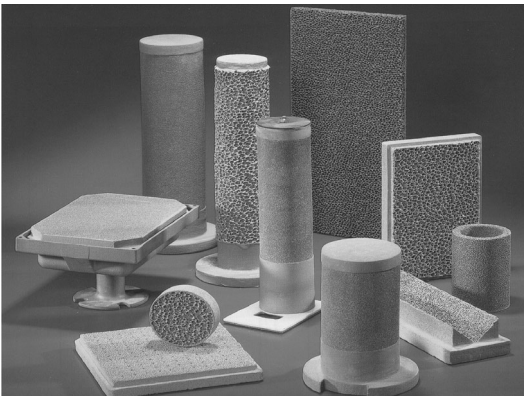


그림 2. 분말성형기술에 의해 제조되는 다공질 부품

따라서 본 연구에서는 1)분말소재의 입자 제어 (입자의 초미세화)를 통한 초고강도화기술, 2)합금제어 기술을 통한 경량화기술, 3)기공제어 기술을 통한 다공질재료 기술, 4) 초미세 복합분말 제조 및 성형기술 등 새로운 분말제조 및 정밀부품화 기술을 개발함으로써, 기존 재료

특성의 한계를 돌파할 수 있는 고성능의 새로운 소재의 개발 및 고부가가치형 신산업의 창출에 기여하고자 한다.

그림 1 및 2는 분말성형기술에 의해 제조되고 있는 각종 정밀부품 및 공구, 다공질 소재를 나타낸다.

## 2. 연구현황 및 세부기술 소개

### 2.1 초미립 TiC계 고강도 공구/금형개발

공구 산업에 있어서 절삭 가공속도는 매 10년마다 약 2배 정도씩 급속히 증가해 왔으며, 현재에는 고속화뿐만 아니라 고능률화, 고정도화, 고신뢰화를 추구하고 있다. 공구 및 die 소재는 현재 WC/Co계를 중심으로 한 초경합금과 TiC/Ni계의 cermet 재료가 산업화되어 사용되고 있다. 이들 소재의 경우 경도가 높고 내마모성이 우수한 탄화물(WC 또는 TiC)이 파괴인성이 높은 금속(Co, Ni)에 분산되어 우수한 경도와 내마모성을 나타냄과 동시에 높은 파괴인성과 항절력을 가지고 있어 기계가공에 필요한 절삭공구 뿐만 아니라 몰드 및 die 소재로도 많이 사용되고 있다. 그러나 가공되는 금속재료의 강도가 점차 증가하고, die 및 몰드의 사용환경이 점차 고온/고강도 및 고내마모성을 요구함에 따라 기존의 초경합금과 cermet 소재의 기계적 성질과 내마모 특성의 개선이 요구되고 있다.

WC/Co 초경합금의 경우, 그 응용범위가 drill tip, end mill 및 일부 몰드소재로 한정되어 있으며 이를 보완하기 위해서는 높은 경도를 갖는 TiC/TaC 미립 분말을 혼합한 복합 WC-TiC-TaC-Co계 초경합금이 개발되어 사용되고 있다. 또한 TiC계 cermet 소재의 경우 현재의 경도와 강도를 더욱 증가시키기 위해서는 탄화물 입자크기의 초미립화가 요구되고 있다. 이를 위해 초경합금에 있어서는 내마모성의 개선을

위하여 WC보다 높은 경도를 갖는 TaC 및 TiC가 첨가된 복합초경합금을 제조하는 기술이 1970년대에 개발되었다. 그러나 개발된 기술은 복합초경 합금화에 의해 경도가 향상되었지만 파괴인성이 감소하는 단점을 보이고 있다. 이와 같은 기술적 요구 조건인 경도 및 파괴인성의 동시향상을 충족시키기 위해서는 기존의 초미립 WC/Co 초경합금 개발 기술의 토대위에 초미립 TiC(WC/TaC)/Co계 초미립 소재의 개발이 요구되며, 이러한 기술적 요구가 실현되는 경우 초미립 복합초경합금 뿐만 아니라 초미립 cermet 소재의 개발로 인하여 경도와 인성이 동시에 향상된 새로운 공구 및 금형이 개발될 것이다.

그림 3은 현재 사용 중인 공구소재 및 향후 개발되어야 할 공구소재의 성능을 도식화 한 것이다. 이 그림에서 보면 앞에서 언급된 바와 같이 재료의 경도와 인성의 상반관계 때문에 경도가 높은 소재는 절삭속도를 높일수 있는 반면에 이송속도가 매우 낮고 고속도공구강과 같이 상대적으로 경도가 낮은 공구재료는 절삭시 이송속도를 매우 높일 수 있지만 절삭속도를 높이는 것은 한계를 지닌다. 따라서 향후 개발되어야 이상적인 공구소재는 고속도공

구강과 같은 수준의 이송속도를 가질 수 있는 높은 인성과 ceramic 수준의 절삭속도를 가질 수 있는 높은 경도를 가지는 소재이다.

이러한 이상적인 공구재료의 개발을 위해 ceramic과 금속의 복합소재인 cermet을 이용한 연구를 국내외적으로 활발히 수행되어 왔다. Cermet의 주요 소재인 TiC는 고융점(3150~3250°C), 고경도(vickers 경도 3200kg/mm<sup>2</sup>), 고탄성율을 가지며, 약 700°C까지 비교적 우수한 내산화성을 나타내어, 경질합금의 분산상으로 우수한 성질을 발휘한다. 특히 1970년대에 TiC를 첨가한 TiC계 경질합금이 개발된 이후 TiC 합성기술개발 연구가 활발히 진행되어져 왔다. TiC의 공업적 합성에는 저가의 Ti 산화물(TiO<sub>2</sub>)을 carbon과 반응시키는 carbothermal reduction 방법이 일반적으로 이용되어져 왔다. 그러나 이 방법으로 제조된 TiC의 입자크기는 1~2 $\mu$ m 정도로, 이들 입자가 첨가된 경질합금은 그 특성의 향상에 한계가 있어 왔다. 경질합금의 절삭성을 향상시키기 위한 한 수단으로 TiC 입자크기의 미세화가 제안되어, 1990년대부터 경질합금내에 미립의 TiC를 in-situ로 합성시키기 위해 기계적합금화법(mechanical alloying), 연소합성법(SHS) 등의 응용연구가 일부 대학과 연구소를 중심으로 진행되고 있으나, 아직 만족할 결과를 얻지 못하고 있는 실정이다.

한편 1990년대에 들어 나노구조재료(입자크기 100nm 이하)의 합성에 관한 연구가 재료과학의 새로운 연구분야로 관심을 모아, 물리 기상 응축법, 화학기상 응축법 등의 다양한 극미세분말 제조방법들이 개발되어, 극미세 TiC 분말을 제조할 수 있게 되었다. 그러나 이들 방법들은 실험실적으로는 TiC 분말제조에는 성공하였으나, 산업화를 위한 극미세 TiC 분말의 양산화를 위한 문제점을 해결하지 못하고 있다. 특히 극미세 분말의 대량생산에 적합한 mechano-chemical 공정을 이용한 탄화물 초미립화는

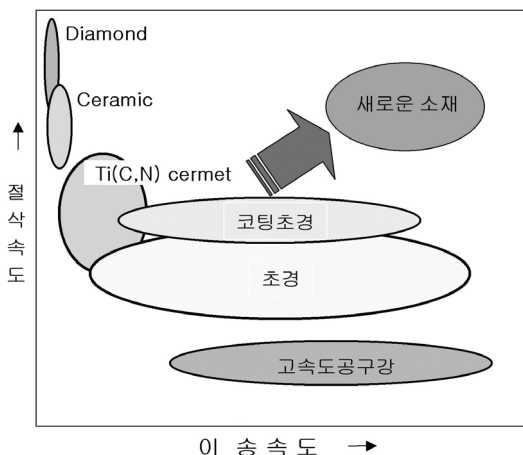


그림 3. 현재 사용 중인 공구재료의 성능 및 향후 개발방향

표 1. 국내외 공구재료 수준 현황

구분	국내 수준	국외 수준
· WC/Co	· 입자크기 : 0.5 $\mu$ m 상용화(대구텃) · 최근 0.1 $\mu$ m급 양산화 개발중(나노테크) · 미립 WC/Co microdrill 국산화	· 입자크기 : 0.1~0.4 $\mu$ m 양산중 (Nanodyne, Xiamen, Sandvick 등) · 초미립 WC/Co microdrill/endmill 상용화 초기 단계
· WC/TiC/ TaC/Co	· 초미립 TiC : 국내 미생산 · TiO <sub>2</sub> 의 carbothermal reduction 연구, 연소합성법, 기계적 합금화(1~2 $\mu$ m급) · 현재 WC, TiC, TaC, Co 혼합하여 사용 (TiC : 1~2 $\mu$ m)	· TiC : carbothermal 법에 의해 생산중 (1~2 $\mu$ m급) · 최근 0.5 $\mu$ m급 TiC 일부 시험개발 · 초미립 WC-TiC(TaC)-Co합금 미개발
· TiC cermet	· 초미립 미개발	· 초미립 미개발

WC에 국한되어 있고, TiC 초미립화 연구는 아직 진행되지 않고 있다. 특히, 입자 미세화에 의한 초미립 WC-TiC-TaC-Co 및 TiC-TiCN-XC-Ni 소재 개발에 관한 연구는 선진국에서 시도된 바가 없다.

따라서 본 연구개발에서는 초미립 TiC계 2원계 복합 분말 및 TiC-WC-(TaC)-Co계 4원계 복합분말을 합성하고 이를 기본 원료로 하여 TiC-WC-(TaC)-Co계의 초미립 초경합금 및 초미립 TiC-TiCN-XC-Ni-C의 cermet을 개발하고자 하는 목적으로 수행되고 있다. 이러한 새로운 초미립 소재를 개발하기 위하여 기존의 공정이 아닌 원자·분자상태에서 출발한 새로운 공정인 mechano-chemical 공정을 산업화하고자 한다.

Mechano-chemical 공정은 구성성분이 원자, 분자상태로 혼합된 금속염의 수용액으로부터 시초분말을 제조한 후 이 시초분말을 일정한 분위기에서 in-situ 환원/침탄시켜 목적으로 하는 탄화물 분말들의 크기가 0.1~0.3  $\mu$ m의 범위로 균일 혼합된 복합분말을 얻는 제조방법이다. 이 공정으로 제조되는 최종 분말의 특성(상, 입자크기, 소결성 등)은 사용한 금속염의 종류, 시초분말의 제조공정 및 환원/침탄공정에 의해 좌우된다.

또한, 초미립 TiC계 복합분말, TiC-WC-(TaC)-Co계 복합분말 및 TiC-Ni계 분말을 공구나 금형재료로 제조하기 위하여 소결시 입자 성장을 최소화시키면서 치밀화시키는 기술에 대한 원리 연구와 제조기술의 확보가 필요하며 조성과 제조조건에 따른 기계적 특성의 연구 및 미세조직과의 연관성 등이 복합적으로 연계되어 연구를 수행하고 있다.

## 2.2 경량 고강도 분말제품 정밀 제조기술 개발

금속분말의 산업적 활용은 2차대전 중에 본격적으로 시도되어 이후 분말의 대량 생산기술, 정밀 성형기술에 의한 부품제조와 합금화나 조직제어에 의한 고특성화 기술 등의 관련기술이 꾸준히 개발되어 그 수요가 비약적으로 증가되어 왔다. 현재 금속분말 중 철계 분말은 전체수요의 약 80%(무게 대비)를 차지하고 있으며 분말부품의 약 80%를 자동차 부품이 차지하고 있어 자동차 산업이 금속분말 관련 시장에 미치는 영향이 매우 지대하다 할 수 있다. 최근까지 자동차에서 분말부품의 적용이 꾸준히 증가해 온 주요 이유는 비록 기계적 특성은 기존의 기계가공 부품보다 뒤떨어지지만 기어와 같은

정밀하고 복잡한 부품을 낮은 제조원가로 대량 생산할 수 있다는 공정상의 장점 때문이었다. 그러나 최근에는 고풍성 분말합금의 개발과 온간성형, 사출성형 및 분말단조 등의 고밀도 정밀성형기술의 개발에 의해 종래의 분말부품에 비해 기계적 특성이 월등히 우수하고, 경우에 따라 기존 주조/단조품 보다 특성이 우수한 부품을 제조할 수 있게 되었다. 또한 설계변경을 통하여 부품에서 불필요한 부분을 효과적으로 제거할 수 있어 부분적인 경량화도 가능하기 때문에 기술개발의 성공여부에 따라 그 수요는 크게 증가할 것으로 예상된다.

현재 자동차와 관련된 최대의 관심기술은 연비 향상과 배기가스 저감에 관련된 기술이다. 연비향상을 위해서는 설계개선에 의한 방법과 소재의 경량화에 의한 방법을 병행하여 추진하고 있고, 배기가스 저감을 위해서 전기자동차 등의 무공해 자동차와 hybrid 자동차가 개발되고 있다. 특히 소재의 경량화는 전기자동차나 hybrid 차의 경우에 주행거리의 증대 등을 위하여 더욱 그 중요성이 커져 향후 자동차 기술의

핵심 개발 대상이라 할 수 있다. 이러한 이유로 분말기술 분야에 있어서 미국 등 자동차 선진국에서 알루미늄 혹은 티타늄 경량 분말소재를 이용한 다양한 부품들이 개발되어 최신형 승용차에 적용되어지기 시작하고 있다. 이러한 부품들은 표 2에서 나타난 바와 같이 GM에서 개발하여 적용하고 있는 알루미늄 cam cap 소결부품, 일본 Sumitomo사에서 개발 적용하고 있는 과공정 Al-Si계 compressor rotor 진밀도 부품, 일본 Toyota 자동차에서 적용하기 시작한 티타늄계 복합재료 엔진밸브 부품류 등을 들 수 있다. 또한 이들 경량 분말소재들의 활용을 증대시키기 위하여 보다 경제적이고 고강도의 분말합금소재와 Al계 복합재료를 이용한 connecting rod 등 고강도 핵심부품개발이 활발히 진행되고 있다. 그리고 독일의 PEAK사에서는 분무성형공정을 이용하여 주조공정과 유사한 제조단가로 내마모성이 탁월한 Al-Si계 소재를 개발하여 Benz 승용차의 cylinder liner에 적용하여 상용화함으로써 분무성형공정을 통한 새로운 알루미늄 소재의 개발과 함께 자동차 부품응용에 대한

표 2. 외국의 경량 분말 정밀 부품 주요연구개발 및 상업화 실적

연구 기관	연구 내용	상업화 내용
GM, Chrysler (미국)	- 합금계 : Al-Cu-Si계 - 제조방법 : 성형 소결 - 주요특성 : 소결 구조부품	자동차용 cam cap 3개 모델에 적용 현재 타모델용 개발중
Sumitomo 경금속 (일본)	- 합금계 : Al-25Si계, Al-17Si-Fe계, Al-AlN계 - 제조방법 : 성형 소결 압출 - 주요특성 : 내마모 내열	Compressor rotor 분말압출 및 단조부품 생산/적용중
Alcoa, AMPAL, PMP(미국)	- 합금계 : Al 2xxx, 6xxx 및 7xxx계열 분말제조	자동차 부품에 대한 상업화 연구 실시 중 Al계 고강도 분말 개발, 상업화
Allied Signal (미국)	- 합금계 : Al-Fe-V-Si - 제조방법 : 성형 압출 - 주요특성 : 내열 고강도	항공기 부품으로 일부 상업화 자동차 부품에 대한 상업화 전무
PEAK (독일)	- 합금계 : Al-25Si계 - 제조방법 : spray forming - 주요특성 : 내마모	자동차용 cylinder liner로 상업화

가시적 결과를 보여주고 있다.

분말재료기술을 이용하여 경량 고강도 정밀 부품을 제조하는 공정은 부품의 용도 및 특성에 따라 성형 소결공정, 열간 고밀도화공정, 분무성형공정 등 다양한 공정을 적용할 수 있지만 가장 중요한 것은 저가격에 고성능의 부품을 제조할 수 있는 공정기술을 확보하는 것이다. 이를 위해서는 원료분말의 설계·제어기술에서부터 최종적으로 정밀도가 높은 고성능 부품을 제조하기까지 요구되는 각종 요소기술을 개발하는 것이 필수적으로 요구됨과 동시에 모든 연구자들이 극복해야 할 기술적 과제 중의 하나이다. 본 연구에 의해서 이러한 기술적 문제점을 해결하기 위해 1) 분말제조기술, 2) 성형 및 소결기술, 3) 고밀도화기술, 4) 분무성형 기술 등의 세부기술로 나누어 연구가 수행되고 있으며 연구가 성공적으로 수행된다면 기존의 철계 자동차·전자 및 기계류 부품을 대체할 수 있는 막대한 시장이 형성되고 경량, 고강도화를 추구하는 미래의 재료기술발전에 큰 공헌을 할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서 수행 중인 세부 기술 및 그 내용은 다음과 같다.

### 분말제조기술

알루미늄 부품용 원소재로 사용되는 분말은 크게 혼합분말(blended powder), 합금분말(pre alloyed powder) 및 복합분말(composite powder)로 나눌 수 있다. 이중 일반 단순구조용 부품(예: cam cap)에 사용되는 분말은 순수 알루미늄과 동분말 등의 원소분말을 혼합한 혼합분말을 사용하고 있다. 이러한 혼합분말은 미국의 Alcoa 등에서도 상업화되어 대량생산되고 있기 때문에 제조기술의 확보 및 원료분말 수급면에서는 큰 문제가 없다. 그러나 내마모 및 내열성 부품에 사용되는 합금분말은 미국, 일본 등에서 한정된 성분의 분말만 개발되었기 때문

에 부품의 특성에 맞는 다양한 종류의 합금분말을 국내·외에서 공급하는 것은 사실상 불가능한 실정이다. 이를 해결하기 위해 본 연구 1 단계에서는 내마모 및 열팽창 특성이 탁월하나 기존의 주단조 공정으로 제조가 불가능한 Al-Si-X계(Si=10~40wt%) 합금분말을 소규모 상업용으로 제조할 수 있는 기술적 기반을 마련하는데 주력하고 있다. 한편 고강도, 고탄성 부품을 제조하기 위해 필요한 복합재료 분말은 알루미늄 기지에 준안정상(Quasicrystal, 이하 QC로 칭함)을 기본 강화상으로 하여 700MPa 이상의 강도를 지니는 복합재료용 분말을 제조하고, SiC 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등의 기존의 강화상을 in-situ로 기지내에 분포시키는 제조공정을 개발하기 위한 연구도 동시에 수행되고 있다

### 성형 및 소결기술

알루미늄 분말을 이용하여 near-net형상의 부품을 제조하기 위한 성형압력은 철계 분말의 1/4수준이면 성형상대밀도 90%이상의 매우 높은 밀도를 얻을 수 있다. 그러나 알루미늄 소결 기술은 철계나 구리계 등 산화성이 적은 분말에 비해 매우 어려운 기술이다. 이는 알루미늄의 강한 산화성에 의해 알루미늄 분말표면에 최소 수 nano 두께의 산화막이 형성되어 있고 이 산화막은 매우 안정하기 때문에 알루미늄의 소결온도 범위에서는 환원이 되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 Mg, Sn 등 저융점 원소를 미량 첨가하여 표면의 산화막과 반응시켜 천이 액상을 형성함으로써 소결성을 향상시키는 방법과 Cu 등을 첨가하여 소결 중 일정량의 액상을 형성하여 액상소결을 하는 기술에 대해 집중적으로 연구하고 있다.

### 고밀도화 기술

고밀도화는 크게 소결품의 형상을 정밀화하고 소결밀도를 보다 향상시키고자하는 sizing기

술과, 성형이나 소결이 어려운 고강도 합금분말이나 복합재료 분말을 단조 또는 압출에 의해 고밀도화 하는 기술로 구분할 수 있다. Sizing 기술의 경우는 기존의 철계나 동계 소결품에서 확보된 기술을 개선, 응용하면 해결이 가능할 것으로 판단되기 때문에 기술적 점에서는 큰 문제가 없을 것으로 예상된다. 그러나 고강도용 Al-Si-X계 합금분말이나 Al-QS, DS 등의 복합재료 분말을 단조나 압출을 통해 고정밀 고밀도 부품을 제조하는 기술은 아직 확보되어 있지 않다. 이러한 소재들의 정밀 압출기술 (near net shape extrusion)을 개발하기 위해서 압출용 빌렛 제조기술, 빌렛의 고온변형특성, 정밀금형제작기술, 적정 압출조건 및 압출하중, 압출변형 최소화, 후가공 공정 등에 대한 연구를 중점적으로 수행하고 있다.

### 분무성형기술

분무성형기술은 분말을 제조하여 성형, 소결 등의 공정을 거치는 방법과 달리 용탕을 직접 분무하여 빌렛 등의 중간소재를 직접적으로 제조하는 공정이다. 본 연구에서는 과포화 Al-Si계 합금을 위주로 대구경 분무성형 빌렛을 제조공정을 개발하고 압출공정을 이용하여 자동차 알루미늄 엔진블록용 실린더 라이너 소재를 제조하는 연구를 수행 중에 있다. 본 연구에서는 기존 확보된 분무성형기술을 바탕으로 실린더 라이너 소재제조를 위한 최적의 공정조건을 확립하여 1단계 내에 자동차 엔진용 실린더 라이너를 시제품을 제조한 후 자동차엔진에 장착하여 dynamo test를 거쳐 그 성능의 국내 자동차업체에서 인정받는 것을 목표로 하고 있다.

그림 4는 현재 GM사에서 사용 중인 알루미늄 분말부품인 cam cap을 나타내며, 그림 5는 분무성형공정을 이용해 개발예정인 cylinder liner를 나타낸다.

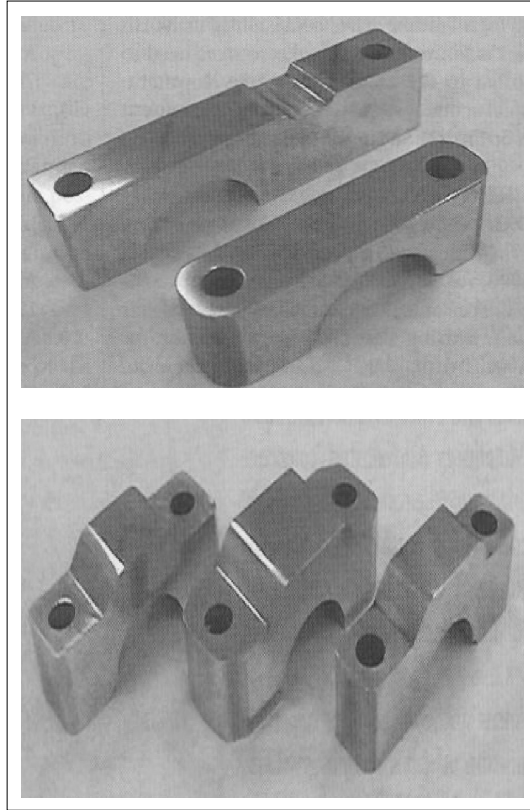


그림 4. GM사에서 사용 중인 자동차용 알루미늄 분말부품 (cam cap)

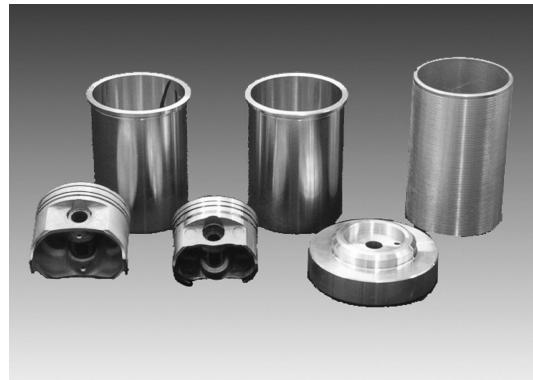


그림 5. 분무성형공정에 의해 개발예정인 자동차용 cylinder liner

### 2.3 기공제어기술개발 및 응용

다공질 재료는 15-95%의 체적이 기공으로

이루어진 재료의 총칭으로, 기존의 치밀한 재료가 갖지 못하는 분리, 저장, 열차단 등의 특성을 부여할 수 있기 때문에 치밀한 재료와 더불어 산업적 중요성이 증대되고 있다. 다공질 재료기술은 크게 1) 재료 내부에 개기공 (open pore, penetrating pore)을 도입하여 filtration/separation 효과를 얻는 부분과 2) 재료 내부에 개기공/폐기공의 크기, 형상, 배향성, 기공율, 분포 등을 제어하여 기존 재료가 갖지 못하는 새로운 특성을 창출하는 부분으로 대별할 수 있다.

다공질 소재는 표 3에서와 같은 다양한 산업 분야에 사용되고 있으며, 다공질 소재의 특성이 해당 system의 특성을 좌우하는 핵심부품이다.

일반적으로 재료 내부에 기공율이 증가하면 강도가 저하된다는 점은 오래 전부터 알려진 사실이다. 그러나 최근 질화규소 세라믹에 elongated 형상의 기공 30%를 삽입하여도 강도 저하가 없는 재료가 개발되었으며, 이는 강

도가 유지되면서 탄성율을 낮추는 효과를 나타내어 재료의 열충격 저항성, 재료의 기계적 안정성, 재료의 경량화가 가능함을 보였다. 이를 계기로 경량화 확대, 정밀기계 부품에 채용 확대(회전기기 부품의 위치제어 용이, 세라믹 재료의 구조적 안정성 증대), 강도 증가된 단열재 및 단열/차열, 흡음/차음 등의 특성이 향상된 재료, 열적, 기계적, 전·자기적, 광학적 특성이 우수한 새로운 재료 창출, 새로운 재료 연구 분야 창출 등의 효과를 가져 올 것으로 기대되며, 동시에 기존 재료가 갖지 못하는 새로운 특성 부여를 통해 new business 창출도 가능할 것으로 기대된다.

또한 각종 내화 재료의 경우 열충격 저항성을 갖기 위해 기공이 필수적으로 존재하여야 하나, 표면 부위의 기공을 통한 액상, 가스상 침식이 내화물 수명을 단축하는 가장 큰 요인인 바, 표면 부위의 기공을 감소시키면서 열응력을 줄이는 연구가 필요하다. 최근에 laser로 내화물 표

표 3. 각종 산업분야에 응용되고 있는 다공질 소재

기능	적용 분야	적용산업
분리 (Filtration / Separation)	- 자동차 : DPF(Diesel Particulate Filter), 배가스 제거용 담체 - 환경산업 : 탈황, 탈질, VOC, 다이옥신 제거용 촉매 담체, 수질정화용 담체 - 식품, 화학 : Filtration/Separation - 의약품, 금속산업(Molten Metal Filter)	ET, BT
비표면적 증대	- Battery, Fuel Cell의 전극재료 - 의료용 Implant - 미생물 Carrier	ET, BT
유속 제어	- 정밀기계용 Porous Air Bearing, 정압 Screw - 각종 산업용 Flow Control Device, Gas Distributor	NT
저장	- Self-Lubricating Bearing - 열교환기, Printer Ink Reservoirs - 비료 Holder	ET, BT
차단	- 흡·차음재, 배기 소음재, 화염 차단재, 단열재	ET
경량화	- 정밀 회전기기 부품	NT
방향성	- 방향성 열 방출, 방향성 단열	ET



면의 기공을 감소시켜 내화물의 수명을 향상한 연구가 영국에서 성공적으로 수행되었으며 (Materials World, Feb., 2001), 이러한 특성 향상은 laser와 같은 고가장비를 사용치 않고 기공 제어기술을 통해서도 가능할 것이며, 이는 좀더 경제적인 방법이 될 것이다.

한편 기계산업용 정밀부품은 점차 소형화, 고정밀화, 고속화 하는 추세이며, 특히 고속회전 기계의 경우 고정밀도를 유지하면서 회전속도 증가가 요구되고 있다. 일반적인 경우 고속 회전하는 회전자 증량에 의한 관성에 의해 정밀 제동이 어려운 바, 고속 회전자의 다공질 재료 채택으로 증량을 줄이는 것이 바람직하다. 강도가 낮은 다공질 회전자를 채용할 경우 설계상 회전자 부피가 커지는 바, 강도가 동일하면서 다공질인 재료가 개발된다면 고속회전 기기의 정밀 제동이 실현될 것이다.

다공질화 기술은 환경 산업의 중요성이 극대화됨에 따라 환경 정화용 필터 관련 부품을 중심으로 전 산업으로 광범위하게 응용되고 있다. 그 구체적 응용분야를 보면 탈황, 탈질, 다이옥신, VOC 제거용 고성능 필터 등의 수요가 급증할 것으로 예상되며, 5년 후 국내시장은 약 2조 원 정도 예상되며, 세계시장은 2001년에 200억 달러, 2005년에는 약 800억 달러 정도로 예상된다. 반도체 장비를 포함한 정밀기계의 위치 제어용 다공성 베어링 및 슬라이드는 1993년 일본의 경우 150억엔 정도의 시장이었으며, 매년 10-20%씩 성장할 것으로 전망하고 있으며, membrane의 경우 2000년 일본 시장은 600억 엔 정도로 추산되었으며, 국내는 400억원 정도이며 매년 30-40% 성장할 것으로 예측하고 있다. 세라믹 재료 내부에 폐기공의 크기, 배향성, 형상, 분포 등을 원하는 대로 제어할 경우 새로운 특성의 단열재/내화물의 출현이 기대되며, 국내 5,500억원 규모의 단열재/내화물 시장의 일부분을 대체할 수 있을 것으로 예상된다. 특

히 강도가 유지되면서 열충격 특성 및 경량화가 이루어진다면 각종 회전 기계 spindle, 고온 회전 기계 부품에의 적용도 증가될 것으로 기대된다.

그리고 전세계적으로 환경, 에너지 문제가 key word이며, 각종 폐기물 처리 설비, 유해물질 제어 설비, 자동차용 매연 장치, 수질정화용 filter, 이차전지용 전극 등과 같이 환경, 에너지 관련 핵심부재는 다공질 재료이다. 상용차에서 배출되는 매연의 경우 전세계적으로 법제화되고 있으며, 국내에서도 2008년경 법적으로 규제할 예정이다. 매연 여과 장치의 경우 국내 시장 규모가 조 단위이며, 엄청난 시장규모에 근거하여 각 나라 별 독자 모델 개발 중이다. 국내 자동차 시장의 중요성에 비추어 국내 독자 모델 매연 여과 장치가 2008년 전까지 개발되어야 할 것으로 판단된다.

따라서 다공질 재료기술은 그림 6에서와 같이 응용범위가 광범위한 파급성이 매우 큰 기술이며, 동시에 고전과 미래가 공존하는 기술이다. 즉 다공질 재료의 가장 큰 응용인 filter는 인류의 역사와 유사한 역사를 가지고 있으며 현재에도 산업 각 분야에 주요 부품으로 사용되고 있다. 종래의 경우 기공의 크기가  $\mu\text{m}$ 에서 mm order였으나, 최근 재료내 기공의 크기를 mm order로 줄이는 연구가 전세계적으로 활발히 연구되고 있으며, 재료 내부에 기공의 크기, 형상, 크기 분포, 배향성 등을 제어함으로써 종래에 재료가 갖지 못하는 새로운 특성을 발현할 수 있다는 인식 아래, 상기에 대한 연구가 재료 연구의 새로운 지평을 열 수 있을 것으로 기대되고 있다. 한편 기공크기를 mm,  $\mu\text{m}$ 에서 mm까지 제어할 수 있다면 정밀 회전기기 주축의 경량화에 따라 최고 회전 속도 도달 및 제동이 용이해지며 air bearing 채용에 따른 정밀도 향상 및 고속 회전 시 발열이 최소화 될 것이다. 그리고 기존 단열재 경우 mm to micron 크기의

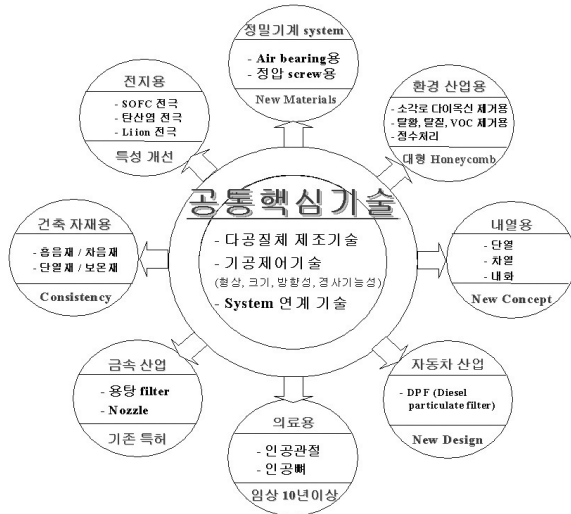


그림 6. 다공질 재료의 응용범위

기공 구조이나, mm 기공 삽입이 가능해지면 기공을 제고 및 단열 특성 극대화 가능할 것이며, 또한 기존 천장재, 벽재 등의 경우도 mm to micron 크기의 기공구조를 갖고 있으나 nano 기공을 삽입할 수 있다면 경량화에 대한 새로운 방법 제시가 가능할 것으로 예상된다. 또한 강도가 동일하면서 더욱 경량화 된다면 상당수의 구조재료를 대체할 수 있을 것이며, nano 기공 삽입 방법이 개발되면 한 차원 높은 다공질 concrete 개발, 투수성 타일/음향 타일, machinable ceramics, 도전성, 자성, 발열성, 유전성, 촉매성 특성을 갖는 다공체 제조가 가능해질 것으로 사료된다. 또한 경량 합금 정밀 주조용 필터 및 나노 크기 입자 제거용 필터 등 향후 필요한 다공질 제품이 개발될 것이다. 그리고 기공형상, 배향성, 경사기능화 등을 동시에 제어할 수 있다면 열충격 저항성, 표면 침식 저항성이 극대화된 내화재료 개발이 가능할 것이며, 방향성 단열 + heat sink가 가능한 새로운 재료 창출도 가능할 것이다. Kiln furniture 특성 (경량화, 장수명화) 극대화가 가능하며, 압전재료, PZT, filter, 생체재료 등의 특성

향상에 의해 새로운 응용이 가능할 것이다.

이를 위해 본 연구에서는 기공크기, 기공율, 기공형상, 기공 배향성, 기공크기/기공율의 gradient 등을 제어할 수 있는 공정 개발, 혹은 복수의 기공변수 들을 동시에 제어할 수 있는 공정 개발을 통해 새로운 특성을 갖는 다공질 제품을 창출하는 것을 주요 목표로 하고 있으며, 1단계에서는 새로운 공정법 개발 및 특성 창출을 주요 목표로 하고, 2단계에서는 1단계에서 도출된 응용품을 제품화하는 연구를 수행할 예정이다.

## 2.4 고온고강도용 분말제품 동적 성형 기술 개발

최근 산업의 고도화로 인해 요구되는 부품의 특성이 기존소재가 가지고 있지 않은 초소형, 초고강도, 경량화, 복합화 및 고기능화와 다양화되고 있는 추세이다. 특히 일반화된 전통부품 산업 뿐 아니라 전자, 우주항공 분야에서는 기존에 없었던 특성을 나타내는 고성능 소재의 요구가 높아가고 있어 전혀 다른 개념의 신소재 개발이 절실히 필요하게 되었다. 본 연구에서는 이러한 요구에 부응하기 위해 초미세 복합분말을 이용한 성형기술을 개발하고자 한다.

초미세 분말의 제조 및 성형기술은 다양한 산업에서 부가가치를 높일 수 있는 기술분야로서, 기존의 용해/주조공정에 비해 편석이 거의 없고 가공 부산물이 생기지 않아 환경친화적이며, 초미세, 고강도, 고인성 부품의 제조가 가능한 장점이 있다. 또한 고정밀, 내마모, 고내식성 및 초경량화가 가능하여 자동차부품에서부터 금형 및 공구 부품, 컴퓨터 칩 부품, 센서 및 촉매부품에 이르기까지 각종 산업제품에 다양하게 활용할 수 있는 차세대 기술분야이다. 최근 들어 자동차, 일반기계, 전자, 항공 및 우주 산업을 비롯한 다양한 제조분야에서 소형화, 경량화,

정밀화부품의 요구가 크게 대두되고 있으며 이러한 요구에 효율적으로 대처할 새로운 소재 및 부품개발이 필요하게 되었다. 자동차 경량화의 예를 든다면 그림 7에서 보는 바와 같이 수송기계의 사용이 증가함에 따라 그에 필요한 연료가 해마다 크게 증가하여 석유 자원고갈 뿐 아니라 환경오염 등의 문제점을 야기하고 있다. 그러나 2005년 경에 경량분말소재 및 초미세 성형기술개발 등을 통한 경량화 수송기계가 개발되면 사용량 증가에도 불구하고 에너지 소비를 크게 줄일 수 있음을 보여주고 있다.

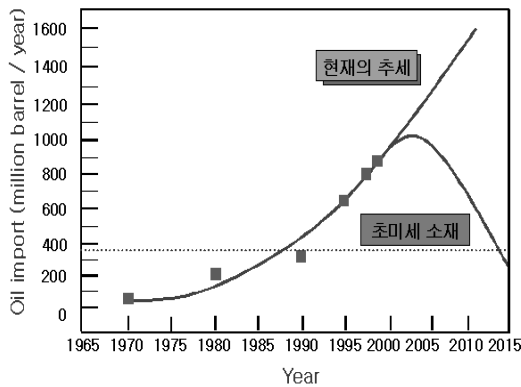


그림 7. 경량화에 따른 에너지 절감효과 (KISTEP2001보고서)

지금까지 초미세 금속분말제조 및 응용 연구 개발은 세라믹 분말에 비해 금속 분말합성 및 분말취급의 어려움 때문에 많은 연구가 되어 있지 않다. 현재까지 세계적으로도 일부 금속에 대해 물리적인 방법 혹은 화학적인 방법으로 초미세 금속분말을 실험실적으로 혹은 시간당 수 kg 정도를 생산하고 있는 실정이다. 이를 극복하기 위한 방법으로 최근 전기폭발방식을 이용하여 초미세 분말을 제조하는 새로운 개념의 분말 제조방법이 국내외에서 연구되고 있다. 전기폭발방법은 물리적 기상합성법 중의 하나로써 펄스파워를 이용해 전기에너지를 저장, 압축한 후 금속 와이어에 짧은 시간동안 고전압 대전류를 집중 투입하여 증발 응축의 과정을 거

쳐 초미세 분말을 합성하는 방법으로 다른 제조법에 비해 에너지 효율이 매우 높고 펄스의 폭, 전압, 전류를 조절함으로써 쉽게 평균 분말 입도를 조절할 수 있으며 에너지 효율이 낮은 전통적인 방법에 비해 양산화가 가능한 장점이 있다. 또한 공정 자체가 증발 응축과정을 동시에 거치므로 조성이 다른 합금분말의 제조도 가능하고, 분위기를 조절함으로써 산화물, 질화물, 탄화물 및 복합상 분말제조까지 가능하여 다양한 분말을 제조할 수 있는 우수한 분말제조 방법이다. 본 연구에서는 이러한 분말제조 공정을 이용 초미세 분말을 제조 중에 있다.

한편 초미세 분말의 성형 및 소결기술은 세계적으로 러시아, 이스라엘, 미국 등이 많은 연구를 하고 있으나 아직 정립된 기술은 없는 것으로 알려져 있다. 최근 국내외에서 이러한 기술의 정립을 위해 여러 새로운 성형 소결 방법을 초미세 분말에 적용하는 연구를 진행 중이며, 입자성장억제제, 강화제 등 복합분말을 통한 고



그림 8. 개발된 magnetic pulsed press

표 4. 초미세 분말제조, 소결 및 응용기술의 국내외 현황

구 분	국 외	국 내
초미세분말합성	- GPC, MCP, CVC, 액상환원법 등은 일부 상업화 - SFE, 수열법 등 연구단계	- MCP방법이용 WC제조연구 - 액상환원법 양산화연구 - 펄스파워-전기폭발방식이용 금속, 세라믹분말제조 성공
소결성형	- 폭발성형, HIP, CIP, 상온소결, 상압소결 등 연구단계 - 상업화 연구는 전무	- 이론적인연구 및 실험 - 상압소결연구를 추진계획 - 펄스파워법을 이용 일부금속분말 성형화 실험
응용상용화	- 세라믹분말이용 복합재 개발 연구 수행	- Extrinsic 방법으로 연구 추진예정 - MMC, MCC복합재 개발연구 추진중

기능 부품의 개발연구도 진행되고 있다. 본 연구에서는 동적성형방법인 magnetic pulsed compaction 방법을 이용해 초미세분말을 성형하는 기술을 확보하고자 한다,

한편 성형된 미세부품의 고강도화를 위해 금속복합재료를 개발하고자 한다. 금속을 강화시키는 방법으로는 고용강화, 가공경화, 석출경화, 분산강화 및 입자미세화에 의한 강화 등을 들 수 있으며, 다른 강화 기구는 금속이 강화됨에 따라 연성 및 인성의 감소를 가져오지만 입자미세화에 의한 강화기구는 연성 및 인성의 비례적인 감소를 나타내지 않아 최근 연구가 활발히 진행 중이며 이에 따라 초미세 분말의 사용이 증가하고 있다. 그러나 입자 미세화에 따른 강화기구는 열적으로 안정하지 않아 높은 온도에서 creep, recovery, recrystallization 및 grain coarsening과 같은 열적 활성화 방법에 의해 쉽게 열화되는 단점이 있으며 입자크기가 일정 이하가 되면 hall-petch 공식이 더 이상 적용되지 않는 등 기술적으로 해결해야 할 문제들이 많다. 또한 최근에는 입자가 미세화되면 연성 및 인성이 감소한다는 보고도 있다. 그러므로 강도, 인성, 경도, 입자크기 및 기공크기에 관한 최적조합을 찾아내는 것이 필요하다.

### 3. 맺음말

분말성형 정밀 부품제조 기술은 차세대 소재 성형기술 프론티어사업의 핵심 5대 기술분야 중의 하나로 연구가 수행되고 있다. 본 기술개발을 위해 연구분야가 크게 공구/금형소재 개발 분야, 경량 분말부품제조분야, 기공소재 및 부품제조분야, 초미세분말의 성형 및 부품화 기술 등 4개의 기술분야로 나누어 연구가 수행되고 있다.

분말성형 정밀부품제조기술의 성공적 연구수행은 공구/금형소재 분야에서는 초고강도 금형/공구 품의 국내 자체개발에 의한 제품화를 통해 일본 등에서 수입되는 절삭공구의 대체효과가 기대된다. 또한 세계 일등기술에 의한 막대한 공구 및 금형재료의 수출이 가능하다. 경량 분말부품제조 기술분야에 있어서는 자동차 및 이륜차, 각종 수송기계 부품은 물론, 정밀기계산업, 가전제품 및 PC 등의 부품 및 품질의 고급화를 지속적으로 추구할 수 있다. 그리고 지금의 철계 위주의 분말부품시장을 알루미늄 등의 경량분말부품으로 전환이 가능하여 환경적, 에너지적 측면의 기대 효과가 매우 높다. 고성능 다공질체 제조공정은 초정밀 동작기계,

반도체 제조장비의 이송 및 위치제어 부품으로 활용되는 air bearing, 정압 screw 등에 적용될 뿐 만 아니라, 수질환경 개선용 microfilter, membrane, 생물산업용 인공토양, 미생물 배양용 다공질체 및 차세대 단열재, 내화재에도 활용될 수 있다. 그리고 초미세 분말의 성형기술

로 전자부품 등 다기능이며 복잡한 형상의 소형 부품이나 고강도의 복합재료 분말부품을 제조할 수 있는 능력을 확보하게 되어 분말부품의 사용 영역을 극대화시킬 수 있을 것으로 예상된다.